

デジタル直接駆動マルチコイルモータの高出力・低リップル・低振動化

著者	安田 彰
雑誌名	科学研究費助成事業 研究成果報告書
ページ	1-10
発行年	2020-06-18
URL	http://hdl.handle.net/10114/00024398

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06314

研究課題名(和文) デジタル直接駆動マルチコイルモータの高出力・低リップル・低振動化

研究課題名(英文) Reducing a rotor vibration method of high power and low ripple digital directly drive motor

研究代表者

安田 彰 (Yasuda, Akira)

法政大学・理工学部・教授

研究者番号：30339501

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000 円

研究成果の概要(和文)：本研究では、我々が提案している従来のブラシレスモータの1巻線を複数に分割したマルチコイルモータにおいて、最大出力向上、高回転化、コイルばらつきによるトルク変動低減、ロータの機械的アンバランスによる振動低減を実現した。

マルチコイルモータでは、モータの円周に複数のコイルが配置されている。これらのコイルは個別に駆動可能であり、これにより回転方向だけでなく、軸方向の力を発生させることができる。提案した空間ベクトルで選択された出力ベクトルを生成するコイルの組み合わせは複数あり、この中から振動を打ち消す方向の力を生じさせる組み合わせを選択することで、軸方向の力を発生させ振動を低減させることを可能とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

モータを高回転数で回した場合、ロータや軸の機械的な重量などのアンバランスにより、振動・騒音が生じる。ロータの回転数は高出力化のため高くなっており、軸振動は益々大きな問題となる。本研究では、回転方向のトルクだけでなく、ロータの機械的アンバランスによる振動低減の低減方法を実現した。本方式は、カウンタウエイトなど機械的な対策が不要で、経年変化や負荷変動によって振動が変化した場合でも動的かつ電氣的にこれを低減可能である。本研究は、今後のモータの高速化において重要な技術となる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have proposed a conventional multi-coil motor with multiple windings divided from one winding of a conventional brushless motor. It has improved maximum output, increased rotation, reduced torque fluctuation due to coil variation, and mechanical unbalance of rotor. Vibration reduction has been realized.

In a multi-coil motor, multiple coils are arranged on the circumference of the motor. These coils can be driven individually, so that not only the rotational direction but also the axial force can be generated. There are multiple combinations of coils that generate the output vector selected by the proposed space vector, and by selecting a combination that produces a force in the direction to cancel the vibration, an axial force is generated and the vibration is reduced.

研究分野：電子回路

キーワード：マルチコイルモータ 振動低減 高回転 高出力 高効率 低トルクリップル 空間ベクトル

様 式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我々は、基盤研究(C) 平成 16～18 年度「デジタル信号直接駆動型スピーカの解析と高性能化」および基盤研究(C) 平成 19～20 年度「積層分割構造電気・音響変換器を用いたデジタル直接駆動スピーカの高性能化」基盤研究(C) 平成 23 年度～25 年度「デジタル信号直接駆動型スピーカの大電力高精度・高効率化に関する研究」にて研究を進め、従来にないデジタル直接駆動スピーカ(DDDSP)を提案し、構成方法の確立、実証を行ってきた。さらに我々は、JST 研究成果展開事業 研究成果最適展開支援プログラム A-STEP フィージビリティスタディステージ シーズ 顕在化タイプ 2013 年、課題名「デジタル直接駆動マルチコイル・モータシステム技術の研究開発」では、このデジタル直接駆動技術(DDDM)をモータに応用し、ブラシレスモータのコイルを複数に分割したマルチコイルモータを提案し、入力に応じてこの分割されたコイルの駆動数を制御することで、モータ駆動電力効率を改善するデジタル直接駆動モータ(DDDMO)を実現している。この研究を基盤研究(C) 平成 26～28 年度「巻線を複数に分割したブラシレスモータのベクトル型 駆動方式の検討」に引き継ぎ、駆動効率の向上、トルクむらの低減の実現に向け研究を進め、成果を得てきている。

現在モータは、動力用から制御用まで広く用いられている。電気自動車用やファンモータ等の用途では、負荷トルクが幅広く変化する。これらには、低トルクから高トルクまで効率が高いことが要求されるが、DDDMO では、高トルクのみならず低トルク時の効率も分割されたコイルの一部のみを駆動することで向上させることが可能である。また、低回転から高回転までその使用領域は広い。DDDMO では従来のコイルを M 個に分割することにより $1/M$ の電源電圧で同出力、同回転数を得ることが出来、従来よりも低電圧で高回転化が可能である。

問題点：我々のこれまでの研究では、低電圧駆動、高効率化、トルクむらの低減に主眼をおき、これを解決する手段を提案してきた。一方、モータ駆動に関しては高回転化などまだ取り組んでいない重要な項目が残っている。例えば、冷却ファンモータでは機器の小型化によりモータ本体の小型化が求められている。データセンタのサーバでは省スペース化から筐体の薄型化が進み、ファンモータのサイズも小型化する必要が生じているが、放熱効果を維持もしくは向上させる必要があるため、モータの回転数を最近では 3 万回転まで高くする必要がある。高回転化した場合には、出力トルクの変動やロータの機械的偏心などによる振動、騒音も大きな問題となる。従来はカウンタ重りを用いてバランス調整していたが、回転数が高くなるとこの方法は困難になる。

2. 研究の目的

本研究では、我々が提案している従来のブラシレスモータの 1 巻線を複数に分割したマルチコイルモータにおいて、最大出力向上、高回転化、コイルばらつきによるトルク変動低減、ロータの機械的アンバランスによる振動低減を目的とする。この実現のため、既に提案している分割した各コイルの完全な個別駆動法に加え、多相モータの各相のコイルの完全個別駆動法を研究する。分割したコイルを On-Off することによるデジタル制御を行うが、その際各コイルの選択・駆動を行う。このとき、コイルの逆相駆動を含めた全ての組み合わせからの最適な選択方法、コイルの使用頻度に重みをつけ個別に精密に制御する方法を提案する。これらにより、従来よりも高出力で、さらに機械的アンバランスによる振動を低減できるデジタル直接駆動モータの実現を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、DDDMO 技術における、回転方向の力であるトルクの増大方法、トルク変動の低減法、高回転化の実現方法、ロータのアンバランスによる振動・騒音の低減方法に関し、その問題点を明らかにし、その解決方法を探る。より具体的には、(1)これまでの研究で考慮されていなかった組み合わせ(例：V, W 相を逆相駆動することによる U 相駆動と等価の磁束を生成)を考慮した選択方法の考案(2)U, V, W 各相を構成する複数のコイルをそれぞれ個別に駆動する DDDMO 駆動方式の提案(3)1, 2 の実現法と空間ベクトル法とを組み合わせたモータ駆動法の提案(4)1, 2, 3 による最大出力の増大効果の明確化(5)1, 2, 3 の方法によるコイルのばらつき誤差の影響低減効果の明確化(6)従来の DDDMO における NSDEM では各コイルの使用頻度が等しくなるように制御していたが、軸方向への力を発生させるコイルの組み合わせを実現できる方法の提案(7)6 を単独動作させた場合振動が発生するがその振動生成の明確化(8)6 とロータの偏心情報を用いた振動低減方法の提案(9)以上のシミュレーションによる確認

4. 研究成果

(1) 提案方法

本研究で提案する、高出力かつ機械的アンバランスによる振動を低減できるデジタル直接駆動モータシステムを図 1 に示す。UVW の 3 相信号を の 2 相信号に変換し、これを提案しているハニカム構造型空間ベクトル 変調器(HSVDSM)でベクトル量子化する。これにより、マルチコイルモータの分割されたコイルを on-off のみで駆動することが可能となる。また、 の 2 相信号に変換しているのは、ベクトル制御に用いることを可能とするためである。HSVSM の内部構造を図 2 に示す。ベクトル量子化により生じた量子化誤差成分には、この

ベクトル型 ループによりノイズシェーピングをかけ、高域信号にシフトさせる。モータ駆動時には、モータのインダクタンス成分によりこの成分はコイルに流れることはなく、高精度な駆動が可能となる。HSVDSM では、各相を構成するサブコイルを on する数を決定する。この信号は、マルチコイルモータにおいて、必要な回転トルクを生じさせる信号となっている。本研究では、回転トルクに加え、振動を抑制する軸を中心とする外向きの力（軸方向の力）を発生させる。HSVSM 信号による回転トルク生成をそのままに、軸方向の力を発生させる原理を次に示す。図 3 は従来のマルチコイルモータのコイル構造の例である。U、V、W の巻線はそれぞれ 3 つに分割されており、それぞれは対向したコイルが直列接続された構造となっている。これにより、軸方向の力は生じないようにしている。本提案では、図 4 に示したように、この対向したコイルをさらに分割しこれを個別に駆動することにより、軸方向の力を発生させることが可能となる。

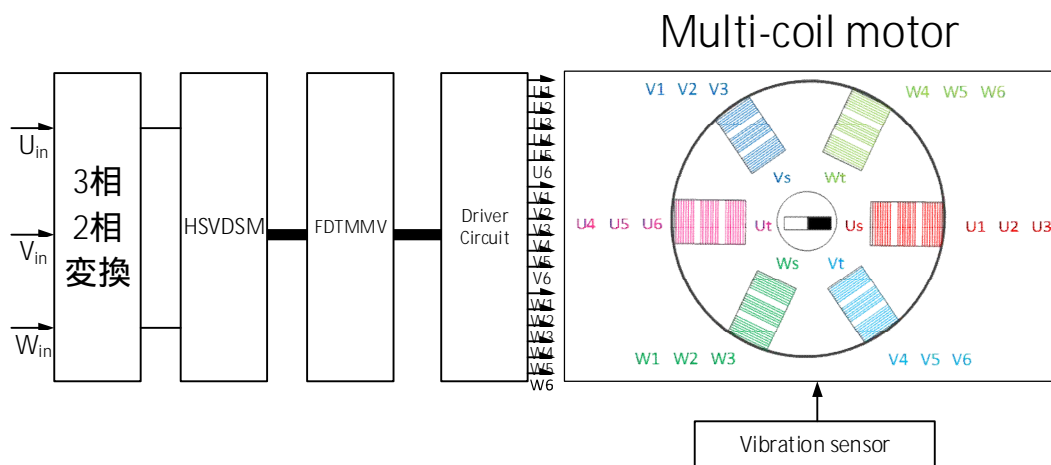


図 1 提案する高出力・軸振動低減型デジタル直接駆動モータシステム

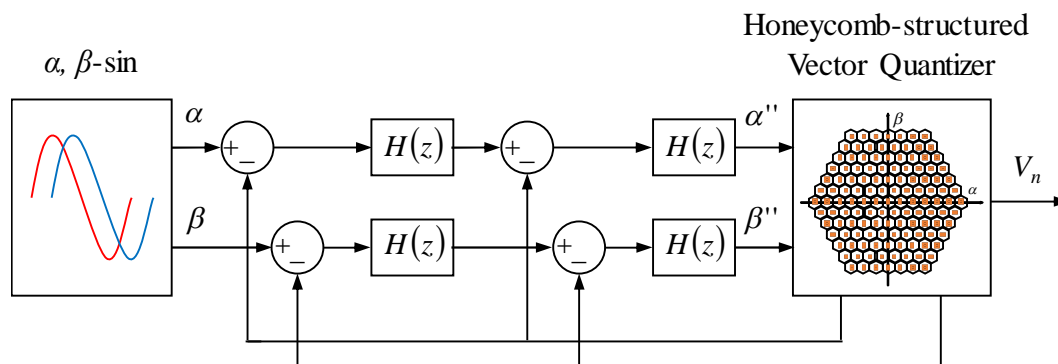


図 2 ハニカム構造空間ベクトル 変調器 (HSVDSM)

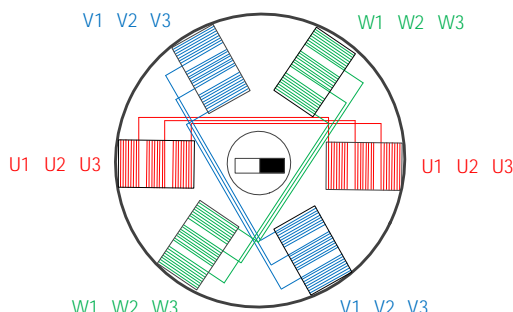


図 3 従来のマルチコイルモータ

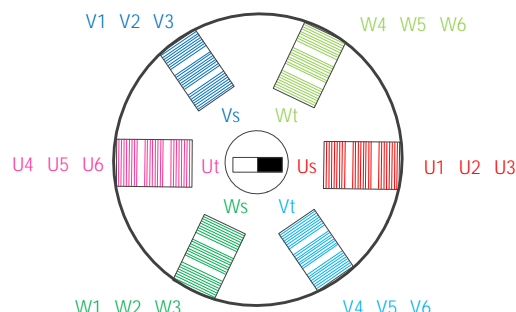


図 4 提案するマルチコイルモータのコイル分割法

図 5 に軸方向の力の生成方法を示す。(a) のように U1 および U4 を励磁すると、ロータに働く軸方向の力はそれぞれのコイルで逆向きとなり、打ち消し合う。(b) のように励磁すると、右向きの力、(c) のように励磁すると左向きの力を発生させることができる。このように回転方向のトルクを変更せず、軸方向の力を制御することが可能となる。

Full-search Dynamic Three-phase Multi-coil-motor Matching with vibration control (FDTMMV)では、振動センサからの情報を元に、発生させたい軸方向の力を上記の方法で生成し、さらに各コイルの使用頻度を均一化させバラツキの影響に対してノイズシェーピングをかける。

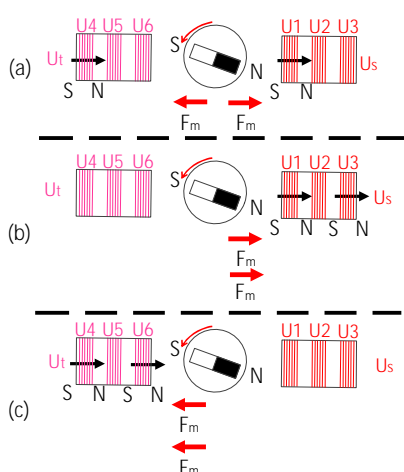


図5 軸方向の力の生成方法

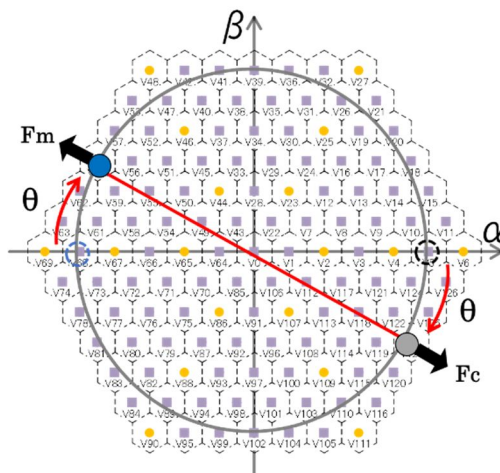


図6 偏心による遠心力と補償法

(2) 検証結果

図6に示したように、回転軸に対し 方向に重りをつけた場合を想定する。ロータが回転することにより、軸は F_c の遠心力を受け振動する。この軸振動を低減するため、本提案方法を適用する。振動を低減するため F_m 方向に力を発生するように制御する。

このときのシミュレーション結果を図7に示す。外側の円は、制御をかけなかった場合で、軸の回転に伴い大きな遠心力を受けている。制御をかけた場合は、赤で示すように振動が低減されることが確認出来る。ここでは、軸から 20mm の位置に 20 g の重りをつけており、回転数は 500 rpm である。

このときの、 U_s 相の駆動スイッチング電圧の和、 U_t 相の駆動電圧の和、同様に V_s, V_t, W_s, W_t の駆動電圧の和を図8に示す。軸方向の力を発生させるため完全な正弦波状にはなっていない。一方、 U 相、 V 相、 W 相それぞれの相内の電流を加算したものを図9に示す。この波形は正弦波となっており、トルクを発生させる成分は、従来のマルチコイルモータと同一となり、コイルのバラツキの影響を抑え高精度なトルク制御が可能である。

このように本研究成果を用いることにより、従来のようにカウンターウェイトを用いることなく、動的に振動を低減することが可能となる。提案方式では、これまでのマルチコイルモータのコイル接続および駆動方法を変更することでこれを実現することが可能である。今後益々高回転化するモータアプリにおいて、重要な技術になるものと期待する。

最後に、本研究遂行のための研究費を支給いただきました日本学術振興会への感謝の意を表します。

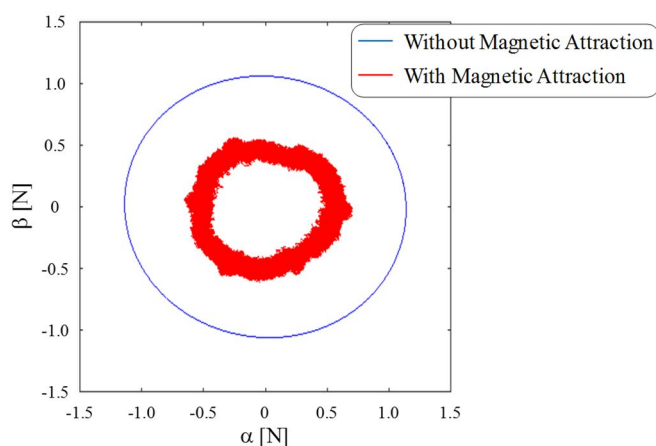


図7 軸振動 (シミュレーション結果)

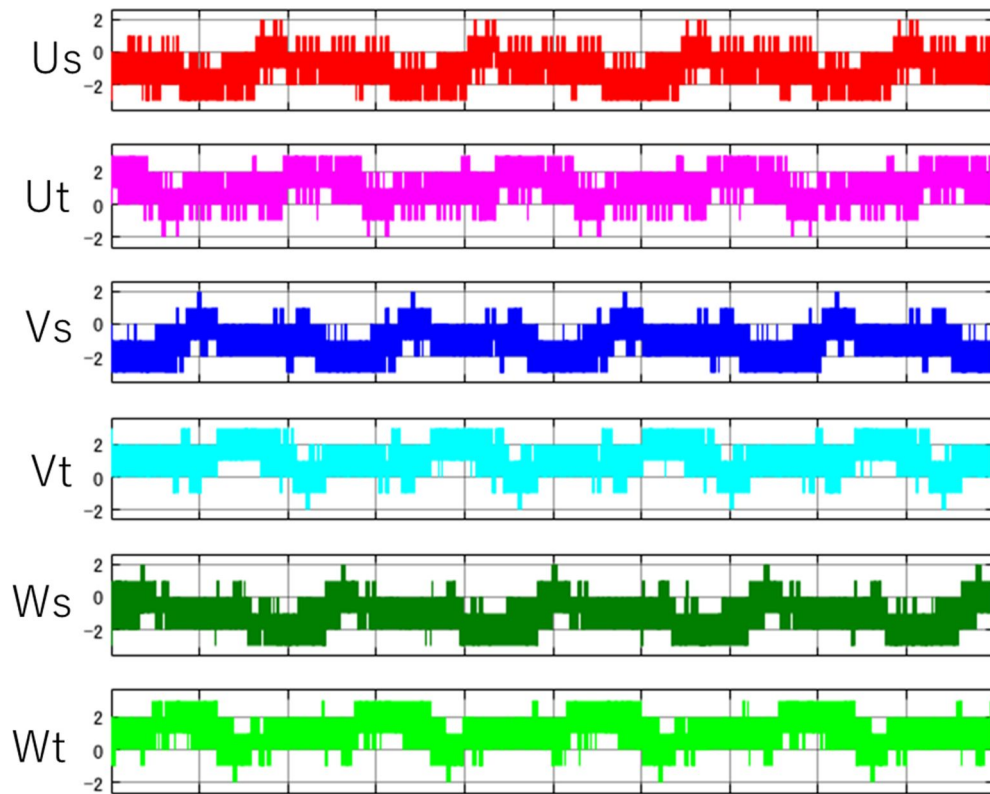


図8 各サブコイルの駆動波形（スロット別）

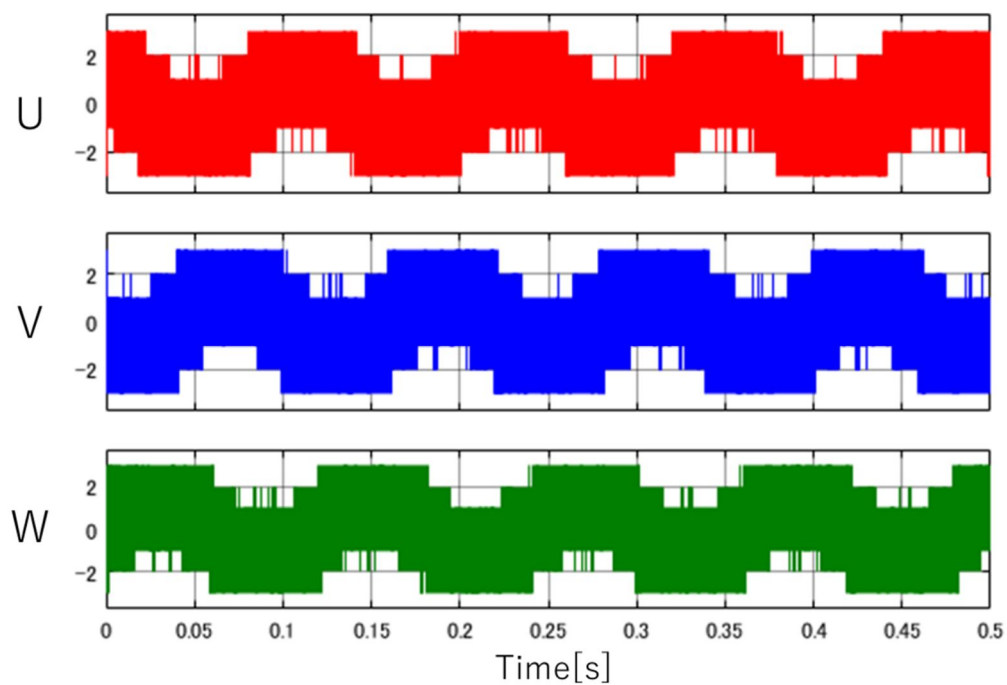


図9 各相全コイルの駆動波形（合算値）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Satoshi Saikatsu, Akira Yasuda	4. 巻 E102-A
2. 論文標題 Delta-Sigma ADC Based on Switched-Capacitor Integrator with FIR Filter Structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Trans. Fundamentals	6. 最初と最後の頁 498-506
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.E102.A.498	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 嘉藤 貴博, 安田, 彰	4. 巻 J101-A, No.6
2. 論文標題 Multiplied Time to Digital ConverterのSimulinkでの検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌 基礎境界	6. 最初と最後の頁 111-118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Haruka Matsuo, Yoshiki Motoyama, Satoshi Saikatsu and Akira Yasuda	4. 巻 11
2. 論文標題 Driving a High-Precision Multi-coils-motor by Reducing an Influence of Manufacturing Variations	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Energy and Power Engineering	6. 最初と最後の頁 48-55
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.17265/1934-8975/2017.01.007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hideki Akiyama, Sogami Yasutaka, Akira Yasuda, Saikatu Satoshi	4. 巻 1
2. 論文標題 An application for tree structure NSDEM to a directivity speaker with amplitude controlling a digitally direct driven speaker	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, 2017 MIXDES - 24th International Conference	6. 最初と最後の頁 73-78
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23919/MIXDES.2017.8005157	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shuta Masuda, Satoshi Saikatsu, Michitaka Yoshino, Akira Yasuda	4. 巻 1
2. 論文標題 A delta-sigma DAC with feedforward jitter-shaper reducing jitter noise	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, 2017 MIXDES - 24th International Conference	6. 最初と最後の頁 50-54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/MIXDES.2017.8004593	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kengo Ando, Takahiro Kato, Satoshi Saikatsu, Akira Yasuda	4. 巻 1
2. 論文標題 A high precision vernier type delta-sigma time to digital converter	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, 2017 MIXDES - 24th International Conference	6. 最初と最後の頁 61-66
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/MIXDES.2017.8005155	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shingo Noami, Satoshi Saikatsu, Akira Yasuda	4. 巻 1
2. 論文標題 A Reduction of Circuit Size of Digital Direct-Driven Speaker Architecture Using Segmented Pulse Shaping Technique	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Signal Processing Systems (SiPS), 2017 IEEE International Workshop	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/SiPS.2017.8109971	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Ayaka Kaburaki, Satoshi Saikatsu, Tomoro Yoshida, Shuta Masuda, Michitaka Yoshino and Akira Yasuda
2. 発表標題 Noise-Shaping Dynamic Element Matching System for Two-Step Analog-to-Digital Converter with Digital-to-Analog Converter and Gain Error
3. 学会等名 International Conference on Analog VLSI Circuits (国際学会)
4. 発表年 2018年

1．発表者名 Takahiro Kato, Kengo Ando and Akira Yasuda
2．発表標題 A study of phase noise suppression in reference multiple digital PLL without DLLs
3．学会等名 International Conference on Analog VLSI Circuits (国際学会)
4．発表年 2018年

1．発表者名 梅澤克之, 安田 彰
2．発表標題 マルチコイルモータの界磁電流制御の一検討
3．学会等名 電子情報通信学会総合大会
4．発表年 2019年

1．発表者名 益子 史, 西勝 聡, 安田 彰
2．発表標題 空間ベクトル 変調を使ったBLDCモータ高精度駆動システムの高次安定化
3．学会等名 電気学会電子回路研究会
4．発表年 2019年

1．発表者名 佐々木翔一郎, 安藤健吾, 吉野理貴, 安田 彰
2．発表標題 フォアグラウンドキャリブレーション型マルチビット TDC
3．学会等名 電子情報通信学会総合大会
4．発表年 2018年

1．発表者名 鍋木彩加・西勝 聡・安田 彰
2．発表標題 FIRフィルタを用いた連続時間型 変調器の一設計法
3．学会等名 電子情報通信学会総合大会
4．発表年 2018年

1．発表者名 鍋木彩加,古屋祐樹,吉野理貴,安田 彰,森山誠二郎
2．発表標題 多品種LSI開発のための動的IPライブラリの一検討
3．学会等名 電気学会電子回路研究会
4．発表年 2018年

1．発表者名 鍋木彩加・吉田知朗・西勝 聡・安田 彰
2．発表標題 フィードバック経路に2種類のFIRフィルタを用いたCTDSMにおける多ビット化によるジッタの影響低減の検討
3．学会等名 電子情報通信学会ソサエティ大会
4．発表年 2017年

1．発表者名 小林智和,大里信平,西勝 聡,安田 彰
2．発表標題 マルチコイルモータのセンサレスベクトル制御
3．学会等名 電気学会電子回路研究会
4．発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----